

用改进的离散坐标法计算炉内三维辐射传热*

魏小林¹, 徐通模², 惠世恩²

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2 西安交通大学, 陕西 西安 710049)

摘要: 采用离散坐标法进行炉内三维辐射传热的计算, 首先在正方体炉膛内验证了该法的精确性, 计算结果与区域法进行比较, 表明离散坐标法算法可靠, 计算工作量小, 适合于炉内辐射传热的计算。然后针对长方体炉膛计算了吸收-发射-散射介质的传热问题, 表明传统的离散坐标法不适合计算具有复杂相函数曲线的辐射传热问题, 因此采用改进的离散坐标法, 并得到了合理的结果。最后, 对于煤粉燃烧炉膛将辐射传热问题和炉内流动、燃烧过程耦合起来进行计算, 表明离散坐标法是一种很有工程应用价值的炉内辐射传热计算方法。

关键词: 辐射; 传热; 计算; 离散坐标法

中图分类号: O 643. 2⁺ 1

文献标识码: A

文章编号: 1006-8740(2000)02-0140-06

Predicting Three-Dimension Radiative Heat Transfer in Furnaces Using Revised Discrete Ordinate Method

WEI Xiao-lin¹, XU Tongmo², HU I Shiren²

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2 Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The discrete ordinate method has been used to calculate the three-dimensional radiative heat transfer in furnaces. Firstly its precision is verified in a cube furnace. Compared with those of the zone method, the results of the discrete ordinate method indicate that its arithmetic is reliable and the computation time is relatively small. So this method is suitable to predict the radiative heat transfer in furnaces. Then the heat transfer problem for absorbing-emitting-scattering media has been calculated in an enclosure furnace. The results indicate the original discrete ordinate method is not fitted to calculate the radiative heat transfer with complex scattering curve. So the revised discrete ordinate method is used to obtain reasonable results. Finally, the radiative heat transfer of a pulverized coal furnace is predicted coupled with furnace flow, combustion process. The results indicate that the discrete ordinate method is one of the radiative heat transfer computation methods which has much value for engineering use.

Keywords: radiation; heat transfer; calculation; discrete ordinate method

在大型煤粉锅炉膛中, 辐射传热占炉膛中总传热的 70% ~ 90% 左右。在运行工况或燃料特性改变时如果仅采用试验方法研究炉内辐射传热的变化是非常困难的, 而且花费相当大, 因此采用精确的辐射传热模拟计算方法非常重要。

求解炉内辐射传热问题的关键是求解辐射能传递

方程(RTE)^[1]。目前求解 RTE 的方法主要有区域法、Monte-Carlo 法和热流法等。其中热流法由于计算工作量小, 现已得到了较大的发展, 出现了球谐函数法、离散坐标法和离散强度法等^[2]。这些新方法不但仍保持较小的计算工作量, 而且计算精度大大提高了, 其结果已逼近区域法和 Monte-Carlo 法的结果。本文采用

* 收稿日期: 1999-01-22; 修回日期: 1999-06-14。

作者简介: 魏小林(1967-), 男, 博士, 副研究员。

离散坐标法进行辐射传热的计算, 并对该法进行了改进, 以适应炉膛内吸收-发射-散射介质的传热问题的计算。

离散坐标法最先是在研究一维天体物理问题时提出来的, 后来又用于多维中子输运问题, 后由 Fiveland^[3] 等人进行了改进, 已经用于辐射传热问题的求解^[4-6]。离散坐标法算法简单、可靠、计算量小, 特别适合进行流动、燃烧和传热过程的耦合计算, 是一种比较有前途的炉内辐射传热计算方法。

1 离散坐标法

离散坐标法求解辐射能传递方程时, 先将网格节点向空间的辐射强度用相应的权值离散到有限的坐标方向上(方程中的积分项用数值积分求得), 这样对任一节点在每一个离散坐标方向上都可以列出离散化的辐射能传递方程, 求解这些方程可求出计算空间的辐射强度和温度分布。

1.1 辐射能传递方程

求解辐射传热问题的基础是辐射能传递方程(RTE), 对于吸收、发射和散射性灰体介质, 辐射能传递方程为

$$(\Omega \cdot \nabla) I(r, \Omega) = - (k_a + k_s) I(r, \Omega) + k_a I_b(r) + \frac{k_s}{4\pi} \int_{\Omega'} P(\Omega', \Omega) I(r, \Omega') d\Omega' \quad (1)$$

式中: $I(r, \Omega)$ 是辐射强度, 它是位置和方向的函数; $I_b(r)$ 是在介质温度下的黑体辐射强度; k_a 和 k_s 是介质的吸收和散射系数。

式中左边表示在给定方向 Ω 上辐射强度的梯度; 右边第一项表示由于介质吸收和散射引起的辐射强度的衰减; 右边第二项表示由于介质本身发射而引起的辐射强度的增强; 右边第三项表示由于其它方向 Ω' 上的入射辐射而散射到 Ω 方向上引起的辐射强度的增强。 $P(\Omega', \Omega)$ 为相函数, 表示能量从投入方向 Ω' 散射到 Ω 方向上的份额。

1.2 辐射能传递方程的离散

对于离散方向 Ω_m , 辐射能传递方程可表示为

$$\mu_m \frac{\partial I_m}{\partial x} + \xi_m \frac{\partial I_m}{\partial y} + \eta_m \frac{\partial I_m}{\partial z} = - (k_a + k_s) I_m + k_a I_b + \frac{k_s}{4\pi} \sum_{m'=1}^M P(m', m) I_{m'} w_{m'} \quad (2)$$

式中: μ_m , ξ_m 和 η_m 表示方向 Ω_m 的方向余弦。

对于漫反射界面, 辐射边界条件为

$$I(r, \Omega) = \epsilon I_b(r) + \frac{\rho}{\pi} \int_{n \cdot \Omega > 0} |n \cdot \Omega'| I(r, \Omega') d\Omega' \quad (3)$$

式中: $I(r, \Omega)$ 为离开边界面的辐射强度; 右端两式分别表示界面发射的辐射能和界面对于投入辐射能的反射量。 ϵ 是界面黑度, ρ 是界面反射率, n 是界面的单位法向矢量。

对于离散方向 Ω_m , 边界条件可表示为(对 x 方向)

$$I_m = \epsilon I_b + \frac{\rho}{\pi} \sum_{\mu_{m'} < 0} w_{m'} |\mu_{m'}| I_{m'} \quad x = 0 \quad (4)$$

$$I_m = \epsilon I_b + \frac{\rho}{\pi} \sum_{\mu_{m'} > 0} w_{m'} |\mu_{m'}| I_{m'} \quad x = L_x \quad (5)$$

对于 y 、 z 方向, 边界条件离散方程与式(4)和式(5)类似。

1.3 离散坐标取法及相函数

离散坐标的取法一般采用 S_n 法^[7], 这些坐标是对称的, 在任意旋转 90° 时坐标值保持不变。 n 值保证在单位球面上的点保证对称性排列。对于三维问题总的坐标数为 $M = n(n+2)$ 。在辐射传热问题计算中, 有时须用较多离散坐标的 S_n 法以保证计算精度, 特别是在计算具有强烈尖冲特征的相函数曲线的散射辐射传热问题时, 若离散坐标太少就会导致计算发散或结果误差太大。

相函数主要与颗粒尺寸参数 ρ 有关, $\rho = \pi D / \lambda$, λ 是颗粒周围介质的波长, 另外相函数与辐射波长 λ 也有较小的关系。当尺寸参数 $\rho \ll 1$ 时, 相函数曲线是前后对称的。当 ρ 增加时, 相函数曲线发生很大的变化。当 $\rho \gg 1$ 时, 几乎所有的散射辐射都集中在很窄的立体角内, 其方向朝向投入辐射的方向。在本文计算的煤粉燃烧炉烟气中包含许多散射小颗粒, 如未燃的煤粉、焦炭和飞灰等, 不同颗粒尺寸参数 ρ 下的散射相函数曲线变化较为复杂^[8]。一般可以用勒让德多项式表示这种复杂的曲线, 见下式

$$P(\Omega', \Omega) = \sum_{n=0}^N (2n+1) a_n P_n(\cos \Psi) \quad (6)$$

可由球面几何导出

$$\cos \Psi = \mu \mu' + \xi \xi' + \eta \eta' \quad (7)$$

显然, 相函数曲线 $P(\Omega', \Omega)$ 包含的系数越多, 则曲线向前的尖冲特征越强, 而要正确描述这一曲线所需的离散坐标也就越多。

相函数曲线 $P(\Omega', \Omega)$ 必须满足由散射能量守恒定律得出的归一化条件为

$$\frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} P(\Omega', \Omega) d\Omega' = 1 \quad (8)$$

在计算有较强散射特征的辐射传热问题时, 尽量满足上式是离散坐标取值的一个基本要求。当然, 离散坐标还须满足求和条件、半区间热流条件和扩散理论

条件(坐标取值三条件)^[9]。经过分析计算发现,对于具有复杂相函数曲线的辐射传热问题, S_n 法很难满足上式, 因此在用 S_n 法求解 RTE 的基础上, 提出了新的离散坐标取法— Q_n 法^[10]。

Q_n 法按单位球面的经度和纬度将球等分, n 是第一卦限内按经度或纬度等分的球面数目, 显然, 第一卦限的球面数目为 $m = n^2$ 块。计算每一块中心的坐标和面积, 就可得到 Q_n 法的离散坐标和加权因子。经分析计算可知, 对于具有复杂相函数曲线的辐射传热问题, Q_n 法不但可以满足离散坐标取值三条件, 而且能够较好地满足式(8)的归一化条件^[10]。

1.4 辐射换热源项

辐射换热源项用下式表示(介质为灰体)

$$Q_R = \int_{4\pi} \kappa_a [I(r, \Omega) - I_b(r)] d\Omega \quad (9)$$

对该式沿所有的 Ω 方向积分得到

$$Q_R = \kappa_a (G - 4E_g) \quad (10)$$

式中: G 表示投入辐射热流; E_g 表示气体辐射力。

G 和 E_g 的求解见下式

$$G = \int_{4\pi} I d\Omega = \sum_{m=1}^N W_m I_m$$

$$E_g = \sigma T^4$$

壁面吸收热流密度为(对于灰体壁面)

$$q = G_1 - J_1 = G_1 - [\epsilon E_{b1} + (1 - \epsilon) G_1] = \epsilon (G_1 - E_{b1}) \quad (11)$$

式中, J_1 为壁面的有效辐射。

1.5 能量方程

能量方程是火焰传热过程数值计算的基本方程^[1], 即

$$\nabla \cdot (\rho C_p T) = \nabla \cdot (\Gamma_T \nabla T) + S_Q \quad (12)$$

式中: 左边是焓 $C_p T$ 的对流项; 右边第一项是扩散项(即导热项); 第二项是源项 S_Q 。 S_Q 包括化学反应热源项 Q 和辐射热源项 Q_R , 即

$$S_Q = Q + Q_R \quad (13)$$

方程(12)通过炉内三维流动燃烧方程进行求解。若假设炉内传热过程中对流项和扩散项的作用可以忽略, 则有

$$Q + Q_R = 0 \quad (14)$$

将式(10)代入上式, 得到

$$\kappa_a (G - 4E_g) + Q = 0 \quad (15)$$

利用式(12)或(15)即可求出炉内的温度分布。

2 计算结果与讨论

本文作者利用自编的离散坐标法程序计算了三维

区间内的辐射传热问题, 首先用 S_n 法计算了单位立方体内吸收-发射介质的传热问题, 并与区域法的结果进行了对比, 验证了程序的可靠性; 然后用 Q_n 法计算了长方体炉膛内吸收-发射-散射介质的传热问题(具有复杂的散射相函数曲线), 表明新方法适合于求解富含粉粒介质的炉内传热问题(如煤粉炉内含有灰粒、焦炭、炭黑、未燃煤粉等颗粒); 最后计算了三维煤粉炉内的辐射传热问题。

2.1 正方体内吸收-发射介质的传热问题

计算对象为如图 1 所示的炉膛, $L_x = L_y = L_z = 1$ m, 化学反应热源项为零。为了计算和分析方便, 各壁面黑度均取 1, 并直接给出了各壁面的辐射力, 其值如下:

$$\left\{ \begin{array}{ll} x=1 & E_w=1 \\ y=0 & E_w=1 \\ z=0 & E_w=1 \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{ll} x=0 & E_w=0 \\ y=1 & E_w=0 \\ z=1 & E_w=0 \end{array} \right.$$

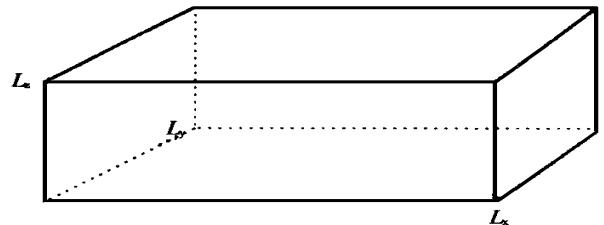


图 1 辐射传热计算所用的炉膛

计算时采用离散坐标法中的 S_2, S_4 和 S_6 法, 分别对应着 8、24 和 48 条热流路径。收敛条件为残余相对误差小于 10^{-4} 。计算结果与文献[11]的区域法结果进行了比较。

图 2 为 $z = 0.5$ m 面上的辐射力计算结果, 图中的 (a)、(b) 和 (c) 代表 y 方向的不同位置 ($y = 0.1$ m, $y = 0.5$ m 和 $y = 0.9$ m)。由于 S_4 法和 S_6 法计算的结果很接近, 因此图中只给出 S_2 法和 S_6 法的结果, 可以看出 S_6 法的结果很接近区域法的结果, 辐射力的最大误差小于 5%。图 3 为 $z = 1.0$ m 面上的壁面热流分布计算结果与区域法结果的比较, 两者吻合较好, 只是在几个接近边界点的位置误差较大。在 $x = 0.1$ m, $y = 0.5$ m 和 $z = 1.0$ m, 误差最大, 达 19.2%, 这可能是该点本身的热流值较小的缘故。

2.2 长方体内吸收-发射-散射介质的传热问题

计算对象为如图 1 所示的长方体, $L_x = 2$ m, $L_y = 2$ m, $L_z = 1$ m, 化学反应热源项 $Q = 5.0$ kW/m², 壁面温度及黑度如下:

$$\begin{array}{lll} z=0 & T_w = 1200 \text{ K} & \epsilon = 0.85 \\ z=4 \text{ m} & T_w = 400 \text{ K} & \epsilon = 0.70 \end{array}$$

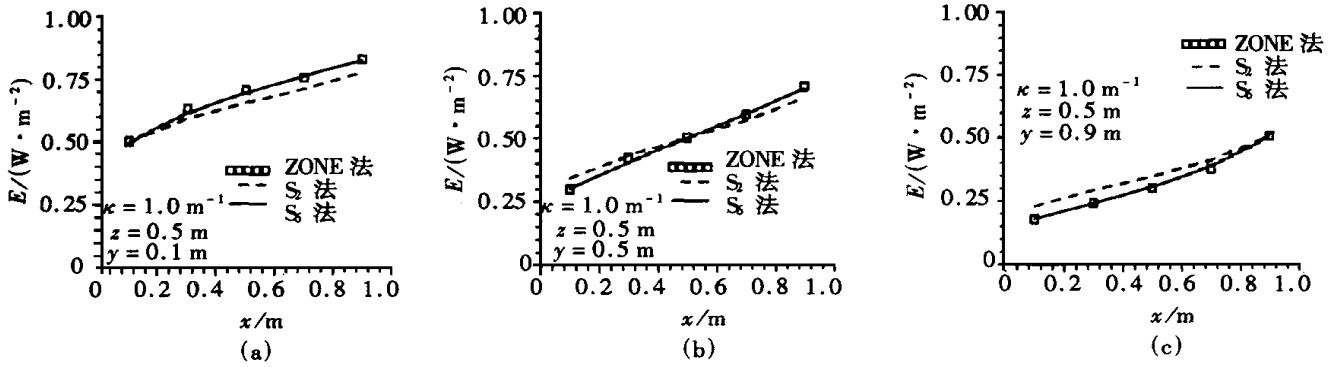


图2 正方体炉膛内吸收-发射介质的辐射力计算结果

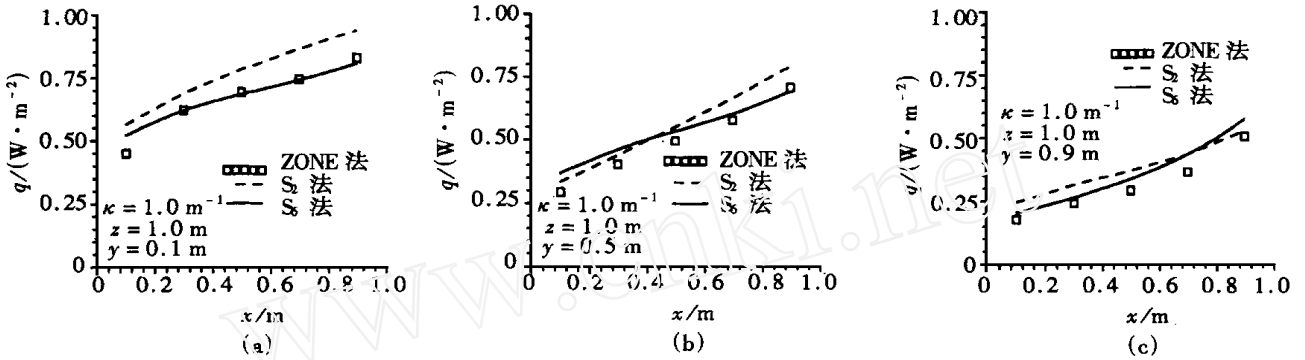


图3 正方体炉膛内吸收-发射介质的辐射热流计算结果

其它 $T_w = 900\text{ K}$ $\epsilon = 0.70$

计算时的散射相函数选用文献[12]给出的三种系数, 分别为相函数 I、II 和 III, 对应的系数个数分别为 7 个、16 个和 26 个, 系数越多, 表示相函数曲线越复杂, 而且曲线向前的尖冲特征也越强。

首先采用离散坐标法中的 S_4 和 S_6 法进行计算。图 4 是壁面热流的结果, 对于相函数 I, S_4 和 S_6 法的计算结果还较合理, 两者比较接近; 对于相函数 II, S_4 和 S_6 法的计算结果相差甚远, S_4 法的结果已无意义;

对于相函数 III, 用 S_n 法计算的结果发散, 图中未画出, 这是由于 S_n 法不能满足相函数曲线的归一化条件所致, 因此采用 Q_n 法计算该问题。

图 5 是不同散射相函数时, 壁面热流的计算结果, 由图可见, 相函数对于炉内传热状况有较大影响, 当相函数由 I 变到 III 时, 壁面上的热流增加, $z = 0$ 和 $z = 4\text{ m}$ 时, 壁面最大热流分别增加 13.00% 和 21.88%, 这是由于散射相函数曲线的尖冲特征增强了壁面传热的强度。

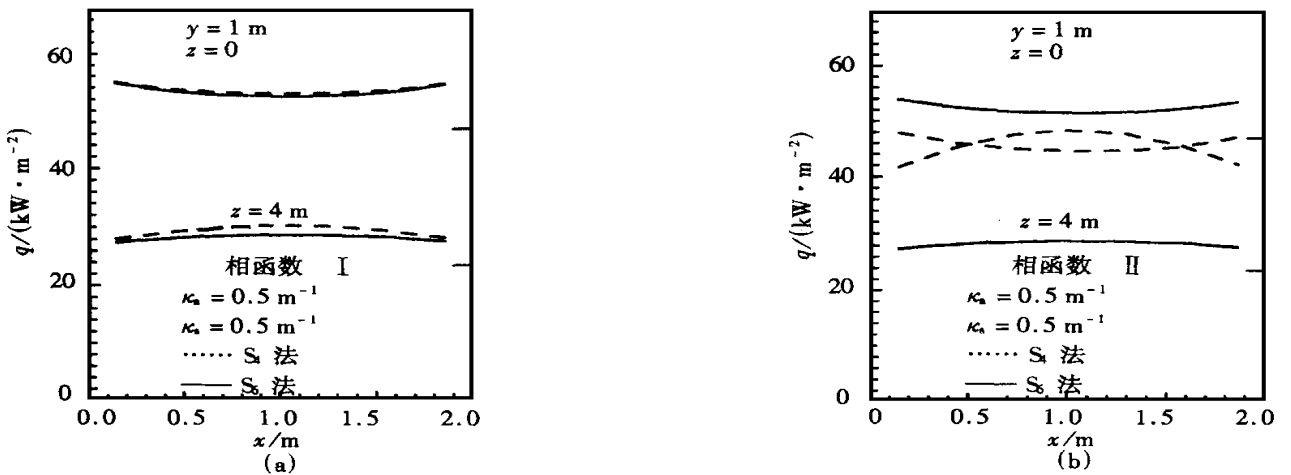


图4 长方体炉膛内有复杂散射相函数曲线的吸收-发射-散射介质辐射传热问题的 S_n 法计算结果

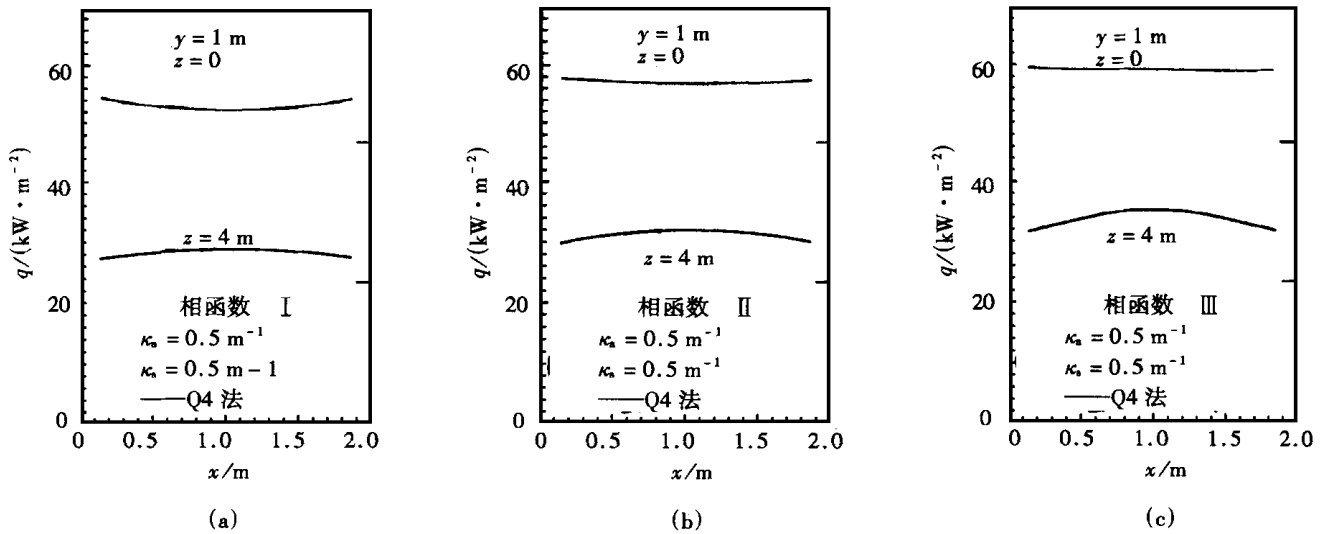


图 5 长方体炉膛内有复杂散射相函数曲线的吸收-发射-散射介质辐射传热问题的 Q₄ 法计算结果

2.3 煤粉炉内复杂介质的传热问题

计算对象是一个 0.63 m × 0.77 m × 4.20 m 的长方体煤粉燃烧炉膛, 炉内传热介质为充满了灰粒、焦炭、炭黑、未燃煤粉等颗粒的火焰和烟气。流场通过求解流动方程得到, 化学反应热源项由随机轨道法求解燃烧方程得到, 壁面温度用燃烧试验的数值给定, 用离散坐标法求解辐射传热方程得到炉内温度和壁面热流分布。流动方程、燃烧方程和传热方程耦合求解, 燃烧煤种为铜川贫煤。详细的方程描述、计算方法以及参数设定见文献[13]。

图 6 是炉内中心温度的计算结果与试验结果的比较, 两者的变化规律一致。在煤粉燃烧的初始段两者吻合得较好, 而在焦炭燃尽段, 计算的炉内温度低于试验值, 这可能与计算时设定一些参数为均匀分布有关。图 7 是沿炉膛高度壁面热负荷不均匀系数的计算结果与

试验结果^[14]的比较, 两者的分布规律在定性上是一致的, 但计算出的热负荷最高点比试验结果提前。在焦炭燃尽段, 计算的热负荷不均匀系数也比试验值低, 这与炉内温度分布计算的结果是一致的。图 8 为炉膛中部壁面宽度的热负荷不均匀系数的计算结果与试验结果的比较, 两者在分布规律在定性上是一致的, 在炉壁中间两者符合得较好, 而炉壁两侧数值则有差距。

总的来说, 离散坐标法可以很方便地计算煤粉炉内的燃烧和传热过程, 计算结果合理。然而由于煤粉燃烧过程涉及多方面的基础研究领域, 很多计算参数只能通过文献数据给出, 因此计算结果与试验结果相比, 有一定误差。但本文的工作仍然证明离散坐标法算法简单、可靠, 计算工作量很小, 很容易与流动、燃烧过程的程序耦合计算, 是一种很有工程应用价值的炉内辐射传热计算方法。

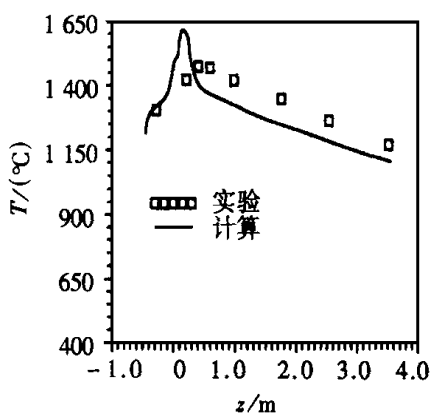


图 6 煤粉炉内中心温度的计算结果

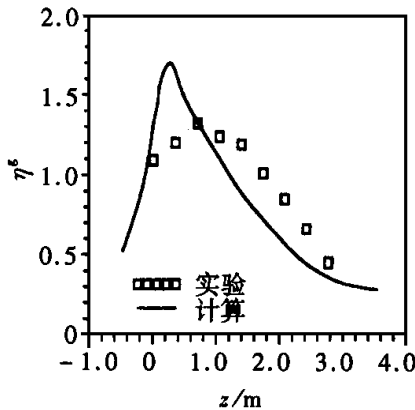


图 7 沿炉膛高度壁面热负荷不均匀系数的计算结果

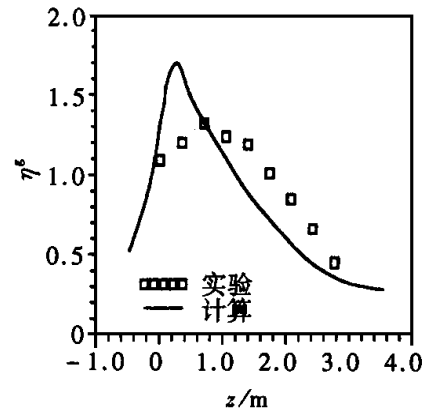


图 8 沿炉膛中部壁面宽度热负荷不均匀系数的计算结果

3 结 论

本文应用离散坐标法及其改进算法进行了炉内三维辐射传热的计算, 首先在正方体炉膛内计算了吸收-发射介质的辐射传热问题, 计算结果很接近区域法的结果, 辐射力的最大误差小于5%, 壁面热流分布的结果两者也吻合较好, 只是在几个接近边界点的位置误差较大。然后针对长方体炉膛计算了吸收-发射-散射介质的传热问题, 表明对于具有复杂散射相函数曲线的传热介质, 传统的离散坐标法(S_n 法)无法得到合理的结果, 因此采用了新的离散坐标法— Q_n 法, 结果表明相函数对于炉内传热状况有较大影响, 当相函数的尖冲特征增强时, 壁面热流增加。最后, 应用离散坐标法耦合计算了煤粉燃烧炉膛内复杂的流动、燃烧和传热过程, 炉内温度和壁面热负荷的计算结果与试验结果在定性上一致。

参考文献:

- [1] 王应时, 范维澄, 周力行, 等. 燃烧过程数值计算[M]. 科学出版社, 1986
- [2] Viskanta R, Menguc M P. Radiation Heat Transfer in Combustion System [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1987, 13 (2): 97~ 160
- [3] Fiveland W A. Three-Dimensional Radiative Heat Transfer Solutions by the Discrete-Ordinates Method [J]. ASME HTD, 1987, 72: 9~ 18
- [4] Adams B R, Smith P J. Three-Dimensional Discrete-Ordinates Modeling of Radiative Transfer in a Geometrically Complex Furnace [J]. Combustion Science and Technology, 1993, 88: 293~ 308
- [5] Jamaluddin A S, Smith P J. Predicting Radiative Transfer in Axisymmetric Cylindrical Enclosures Using the Discrete Ordinates Method [J]. Combustion Science and Technology, 1988, 62: 173~ 186
- [6] Truelove J S. Three-Dimensional Radiation in Absorbing-Emitting-Scattering Media Using the Discrete-Ordinates Approximation [J]. J Quant Spectros Rad Transfer, 1988, 39: 27~ 31.
- [7] Carlson B G, Lathrop K D. Transport Theory—the Method of Discrete Ordinates [A]. Computing Methods in Reactor Physics [C]. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1968
- [8] 布洛郝 A Γ. 锅炉炉内传热 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988
- [9] Truelove J S. Discrete-Ordinates Solutions of the Radiation Transport Equation [J]. J Heat Transfer, 1987, 109 (4): 1048~ 1051.
- [10] Wei Xiaolin, Xu Tongmo, Hui Shi 'en. Three-Dimensional Radiation in Absorbing-Emitting-Scattering Medium Using the Discrete-Ordinates Approximation [J]. Journal of Thermal Science, 1998 7(4): 255~ 263
- [11] Larsen M E, Howell J P. The Exchange Factor Method, An Alternative Basis for Zonal Analysis of Radiating Enclosures [J]. J Heat Transfer, 1985, 107 (4): 936~ 942
- [12] Menguc M P, Viskanta R. Comparison of Radiative Transfer Approximations for a Highly Forward Scattering Planar Medium [J]. J Quant Spectros Rad Transfer, 1983, 29: 381~ 394
- [13] Smoot L D, Smith P J. 煤的燃烧与气化 [M]. 北京: 科学出版社, 1992
- [14] Wei Xiaolin, Xu Tongmo, Hui Shi 'en. Experimental and Numerical Study of Pulverized Coal Combustion with Rich-Lean PC Stream [A]. Proceedings of International Conference on Power Engineering (ICOPE-97) [C]. Tokyo: 1997, 2: 447~ 452